ATR実証炉の燃料設計

Fuel Assembly Design for the Demonstration Advanced Thermal Reactor

若林利男*	Toshio Wakabayashi	十亀 求***	Motomu Sogame
菅原 悟*	Satoru Sugawara	後藤幸徳***	Yukinori Gotô
藤本幸生**	Kousei Fujimoto	畦倉和雄****	Kazuo Azekura
笹川 勝***	Masaru Sasagawa		



ATR実証炉の燃料集合体 ガドリニア添加, 軸方向富化度多領域化などの改良を行った燃料である。

ATR(Advanced Thermal Reactor:新型転換炉) 実証炉では、炉心高性能化を図るため、改良燃料(ガ ドリニア入り燃料, 軸方向富化度多領域燃料)の開 発を行っている。これまでに、燃料熱設計の面では、 熱的健全性確保の観点から, スペーサ位置最適化な どの設計改善を行うとともに限界熱流束相関式の改 良燃料に対する適用性を,実規模ループでの試験結 果に基づき確認した。燃料製作の面では、照射時健

全性を確認するための先行照射燃料用の燃料部材 (スペーサ,上下部タイプレートなど)を製作した。 これらの部材を使用した燃料は、現在原型炉「ふげ ん」で順調に照射されている。また、軽水炉などの 動向を踏まえ,いっそうの高燃焼度化を目指した燃 料概念の検討、およびこれを支える詳細解析手法の 開発を進めている。

19

* 動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター 工学博士 ** 電源開発株式会社 原子力部 *** 日立製作所 日立工場 **** 日立製作所 エネルギー研究所 工学博士

1 はじめに

ATR(Advanced Thermal Reactor:新型転換炉)実 証炉の設計では,動力炉・核燃料開発事業団が進めてい る各種の研究開発成果を反映し,炉心の高性能化を進め るとともに,このための改良燃料の開発を実施している。 この高性能化のねらいは,ガドリニア入り軸方向富化 度多領域燃料を採用することによって出力分布の平たん 化を図り, 圧力管集合体数(燃料集合体数)を低減して平 均出力密度を向上させるとともに,いっそうの安全性向 上を図ることである。

この具体案として,新旧燃料間の出力差低減のために 新燃料の出力を抑制するガドリニアを添加し,また,軸 方向の出力分布平たん化のために,プルトニウム富化度 およびガドリニア濃度領域を軸方向多領域とした改良燃 料を採用している。 以上確保されるように決定している。通常運転中の MCPRは、燃焼に伴う出力分布の変動などを考慮して も、運転限界MCPR以上の熱的裕度を確保するようにし ている¹⁾。

2.2 改良燃料の特徴

実証炉の燃料集合体は、図1に示すように36本の燃料 要素が同心円状に配置され、軸方向に配置された12枚の スペーサによって支持されている。

改良燃料は,中間層燃料要素の3本あるいは4本にガ ドリニアを添加することによって新旧燃料間の出力差を 低減し,さらに軸方向富化度多領域燃料の採用によって 軸方向出力分布の平たん化を図っている。

2.3 改良燃料に対する熱的健全性の確保

(1) スペーサ間隔の調整による熱的裕度の向上

軸方向に配置された12枚のスペーサは、その下流側で 冷却材の乱流混合が促進されるため、燃料の冷却特性を 向上させる効果があり、この効果はスペーサ位置から遠 ざかるにつれて減少する。したがって、燃料要素表面での 伝熱形態の核沸騰から膜沸騰への遷移は、スペーサの上 流側直前で発生し、またスペーサ間隔が狭いほどCHFは 向上する。一方、燃料要素の冷却性は、クオリティおよ び熱流束がともに大きくなる位置で厳しくなる。このた

ここでは、炉心高性能化に関連する燃料開発として、 改良燃料の熱的健全性確保のために行ったスペーサ位置 最適化などの設計改善、および照射時健全性を確認する ための先行照射燃料の製造の概要、また、現在実施して いるいっそうの高燃焼度化を目指した検討についてその 概要を述べる。

2 熱的健全性の確保

2.1 ATR実証炉における熱的健全性の評価手法

ATR実証炉の炉心熱設計では,燃料の熱的健全性を示 す指標としてMCPR(Minimum Critical Power Ratio: 最小限界出力比)を使用している。MCPRは,燃料集合体 の限界出力と実際の出力との比の炉心内最小値として定 義され,限界出力に至るまでの熱的裕度を示している。 限界出力は,動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センタ ーHTL(大型熱ループ)の実規模伝熱限界測定実験デー タをベストフィットしたCHF(Critical Heat Flux:限 界熱流束)相関式を用いて評価される。ここでCHFとは, 燃料要素表面での伝熱形態が核沸騰の範囲にとどまる最 大の熱流束である。CHF相関式は,燃料集合体の水平方 向断面平均クオリティの関数として表され,クオリティ が大きくなるほどCHFは低下する傾向がある。また,ク オリティ以外の各種パラメータ依存性は,補正係数の形



でCHF相関式に反映されている。

20

通常運転中に守るべきMCPRの限界値(運転限界 MCPR)は,運転時の異常な過渡変化が生じた場合でも, 炉心内全燃料要素のうちCHFに至らないものが99.9%

(a) 水平断面 (b) 垂直断面

図 | 実証炉の燃料集合体形状 36本の燃料要素が同心円状 に配置され,軸方向に12枚配置されたスペーサにより支持されている。

め、出口付近を除く軸方向上部でのスペーサ間隔を狭く することにより、熱的裕度の向上を図っている。

軸方向富化度多領域燃料の採用による軸方向出力分布 の平たん化により、クオリティの大きくなる出口付近で の熱流束が大きくなるため、MCPRとしては厳しくな る。また、MCRRの発生位置も軸方向上部側に移動する。 このため、改良燃料の採用に伴い、図2に示すように最 小間隔を持たせるスペーサの位置を軸方向上方に1段移 動し、熱的裕度の向上を図っている。この変更により、 MCPRをサイクル初期で約1%、末期で約3%改善して いる。

(2) 局所出力分布に対する熱的裕度の検討

ガドリニア入り燃料は, RPF(Radial Peaking Factor:径方向出力ピーキング係数)を低減する一方,ガド リニアの添加された燃料要素の出力が低下するため,相 対的に局所出力分布はひずむことになる。したがって, 核設計を行うにあたり, RPFとLPF(Local Peaking Factor:局所出力ピーキング係数)の組み合わせを考慮 し,運転限界MCPRを満足する範囲を明確にすることが 重要である。



図3に示すように、運転限界MCPRを満足する範囲は がドリニア入り燃料要素の本数により変化する。これは、 RPFおよびLPFが同じ場合でも、局所出力が最大の燃料 要素以外のものの出力分布がガドリニア燃料要素本数の 相違により、異なることによる。核設計では、上記現象 を踏まえ、燃料のLPFを設定している。一例として、取 替炉心サイクル初期でのガドリニア入り燃料要素3本お 図3 運転限界MCPRを満足するRPFおよびLPFの組み合わせ ガドリニア入り燃料集合体の径方向および局所出力ピーキング 係数の組み合わせは、運転限界MCPRを満足するよう調整している。

よび4本タイプ燃料のRPF最大チャンネルでの, RPFと LPFの組み合わせを図3に示す。両タイプ燃料とも,出 カピーキング係数の組み合わせは,余裕をもって運転限 界MCPRを満足している。

2.4 試験データに基づく熱設計手法の検証

改良燃料に対するCHF相関式の適用性を検証するため, ATR技術確証試験により, ガドリニア入り・軸方向

21



図2 スペーサ間隔の調整による熱的裕度の向上 軸方向富化度多領域燃料の採用により,軸方向出力分布を平たん化している。これに 伴い熱的裕度が低下するため,最小間隔を持たせるスペーサの位置を軸方向上方に | 段移動して熱的裕度の向上を図っている。

富化度多領域燃料の出力分布を模擬したフルスケール試 験体を用いた、伝熱限界測定実験をHTLで実施してい 32)°

(1) 軸方向出力分布の影響

軸方向出力分布の違いによってCHFの特性は変化す ることから、今回、軸方向富化度多領域燃料の平たん化 出力分布を模擬した伝熱限界測定実験を実施し、軸方向 富化度多領域燃料に対しても設計で用いているCHF相 関式が適用可能であることを確認している。

(2) ガドリニア添加燃料要素の影響

ガドリニア入り燃料の局所出力分布を模擬した伝熱限 界測定実験を実施し、ガドリニア入り燃料に対しても設 計で用いているCHF相関式が適用可能であることを確 認している2)。

照射時健全性の確保 3

22

「ふげん」照射用改良燃料の部材の製作は,動力炉・核燃 料開発事業団での従来型燃料の第4次,第5次試作および その後の試作の経験を生かして,実施した。この部材を使 用した改良燃料は、「ふげん」で順調に照射されており、 平成2年12月時点の中間検査(到達燃焼度約5GWd/t) では、外観、寸法ともに異常は認められていない。

高燃焼度化への取り組み 4

軽水炉では,いっそうの経済性向上,高燃焼度化を図 る高経済性炉心の開発が進められており³⁾,また設備利 用率を向上させるために,運転月数を12か月から15か月, 18か月と長期化することも検討されている。

ATRでも,軽水炉の動向を念頭に置いたいっそうの高 燃焼度化など、炉心性能の高度化が重要である。

炉心性能の高度化としては高燃焼度化、燃料利用特性 の改善、およびこれらに基づく運転月数の長期化と、反

燃料集合体の構造は,動力炉・核燃料開発事業団での 5次にわたる試作改良と、同事業団大洗工学センターの CTL(部品機器試験ループ)での炉外耐久試験などの結 果に基づいて設定されたものである(19ページの図参 照)。炉内での健全性は、ATR技術確証試験などにより、 図4に示すような原型炉「ふげん」での約33 GWd/tまで の照射試験、および照射後試験を実施することによって 確認することとしている。

ガドリニアが添加された改良燃料についても、ガドリ ニウムの燃焼特性を確認するため、図4に示すような計 画で,照射試験が平成2年5月から「ふげん」で開始さ れている。「ふげん」の照射試験に使用した燃料の主要な 仕様を表1に示す。

応度フィードバック特性の改善, 運転裕度確保などのた めの出力ピーキングの低減が考えられる。

4.1 高燃焼度化燃料概念の検討

ATR 炉心の高性能化をさらに図るため,以下に述べる 高燃焼度化燃料概念の検討を行っている。

高燃焼度化目標としては、炉心の基本仕様は実証炉と 同一とし、取出し平均燃焼度は、運転開始が同世代の軽 水炉燃料と同等の約48 GWd/tを目標とし、約38~約48 GWd/t, また運転サイクルは18か月連続を目標とし, 12 か月~18か月としている。

高燃焼度化目標を達成するためには、(1)プルトニウム 富化度を増加させる必要があるが、そのために、出力ピー キング係数が増加したり,中性子経済が低下するため,

燃	年 度 料	昭和 57	昭和 58	昭和 59	昭和 60	昭和 61	昭和 62	昭和 63	平成 元	平成 2	平成 3	平成 4	平成 5	平成 6	平成 7	平成 8	平成 9	平成 10	平成 11
1.	従来型燃料	準	備許調	忍可 毒	過		照	射	(24.	4 GW	d/t)	(33	GWd/	(t)					
											照射後	後試験`			/d/t)	(40)	GWd/	t)	
2.	改良燃料				準備	i.	午認可		製造	T	タイ	プリ	照射		~	1,10			



燃料照射試験計画 ガドリニアが添加された改良燃料の照射試験が平成2年5月から開始されている。 义 4

表 | 「ふげん」照射用燃料の主要仕様(改良前後の比較) 改良燃料では,到達燃焼度の伸長を図ったことなどのため,集合 体仕様が従来型燃料に比べ一部異なる。

燃料集合体			従来型燃料 (軸方向富化度一領域)	改 良 燃 料 (軸方向富化度多領域) ガドリニア入り					
項	目			タイプ I	タイプⅡ				
	材	質	U・Pu混合酸化 物焼結ペレット	U・Pu混合酸化物焼結ペレット ガドリニア入りUO2焼結ペレット					
\sim	外	径	約12.4 mm	約12.	4 mm				
	核分裂 (wt	と物質量 t%)	1.7~3.2	2.6~5.0	2.1~4.8				
۶ ۲	²³⁵ U濃 (wt	_{と縮度*} t%)		3.4~3.8	3.3~3.6				
	ガドリニ (wi	ニア濃度* t%)		0.8~1.4	0.7~1.2				
被覆	材	質	ジルカロイ-2	ジルカロイ-2およびジルコニ ウムライナ付きジルカロイ-2					
管	外	径	約14.5 mm	約14.5 mm					
燃料要素	ヘリウム封入圧		約0.3 MPa	約0.3	3 MPa				
燃	全	長	約4,400 mm	約4,4	00 mm				
料[全燃料	要素数	36本	36	本				
余体	ガドリ: 燃料 野	ニア入り 要 素 数		4本	3本				
設計条件	最高 最大線	然 焼 度 出力密度	約35 GWd/t 492 W/cm	約40 GWd/t 492 W/cm	約30 GWd/t 427 W/cm				

性を精度よく解析するための格子計算コードの高度化が 重要である。また、燃料集合体形状を変えた高燃焼度化 燃料のCHF特性を,実規模模擬燃料集合体の伝熱限界測 定実験の実施に先立って予測するためには、その特性を 現象論的に解析できるコードの開発が重要である。

格子計算コードの高度化では, 衝突確率を二次元数値 積分で求める解法を基本として核的な非均質効果を正確 に取り扱かう手法,および計算精度への影響が大きい共 鳴吸収断面積の計算で、

各共鳴レベルごとにクラスタ体 系の共鳴積分を直接数値積分で求める手法などの検討を



注:*ガドリニア入り燃料ペレットでの値

(2)54本などの多数本クラスタの採用により、線出力密度 を低下させるとともに, クラスタ内熱中性子束分布の平 均化を図り中性子経済を低下させないことが必要である。 同時に,(3)ガドリニア入り燃料要素本数の増加,(4)上下 3領域燃料(上部と下部の濃縮度を調整)により、軸方向 出力分布の平たん化を図るなどのくふうが考えられる。

上記方策を反映した高燃焼度化燃料の断面図を,現状 の実証炉燃料である36本クラスタ型燃料と比較して図5 に示す。

この燃料は、36本クラスタ型燃料よりも細径の燃料要 素を54本用い、この中心に太径のウォータロッドを設置 した54本クラスタ型燃料であり、ガドリニア入り燃料要 素は6本程度としている。この燃料概念の実現により, 高燃焼度化などの目標性能は到達できる見通しである。 ATRでの燃料構成と取出し燃焼度および連続運転期間 の変遷を図6に示す。

4.2 詳細解析手法の開発

注: ガドリニア入り燃料要素

(a) 36本クラスタ型燃料 (実証炉燃料)

(b) 54本クラスタ型燃料 (高燃焼度化燃料)

23

高燃焼度化燃料の断面図 図 5 実証炉燃料との比較を示 す。燃料要素数を36から54に増やし、高燃焼度化に伴う出力ピーキ ングの増大に対応している。また, クラスタ内熱中性子束分布平た ん化などのため太径ウォータロッドを設置している。



高燃焼度化燃料の概念検討では	は, その特性をより正確
に評価するため,解析手法を高度	モ化することが重要であ
る。例えば、燃料富化度の増加、	太径ウォータロッドの
採用などの影響を正確に評価し,	高燃焼度化燃料の核特

連続運転期間(月)

注: 軸多領域燃料(軸方向富化度多領域燃料)

図6 ATRにおける燃料構成と取出し燃焼度,運転期間の変 遷 1集合体当たりの燃料本数を増やすことにより、燃焼度お よび連続運転期間の伸長を達成している。

進めている。

CHF特性解析コードは,燃料集合体の限界出力を実現 象を模擬して予測するものである。このコードでは,燃 料集合体断面の冷却材流路を複数の流路(サブチャンネ ル)に分割し,各サブチャンネルごとに質量・運動量・エ ネルギーの各保存の方程式を解くことにより,サブチャ ンネル流量やクオリティを求め,さらに,各燃料要素表 面に沿って流れる液膜流量の変化を解析する。燃料集合 体の伝熱限界は,液膜流量の消失として予測できる。

5 おわりに

ATR実証炉・高性能炉心に装荷する改良燃料(ガドリ

ニア入り燃料,軸方向富化度多領域燃料)に関して,熱的 健全性確保の観点から,スペーサ位置最適化および局所 出力ピーキングの許容限界の設定を行うとともに,限界 熱流束相関式の妥当性を,実規模ループでの試験結果に 基づき確認した。

また,照射時健全性を確認するための先行照射燃料を 製作し,現在「ふげん」で照射中である。

さらに,いっそうの高燃焼度化を目指した燃料の概念 検討,およびこれを支える詳細解析手法の開発を進めている。

- 浅野,外:新型転換炉実証炉の炉心特性と大型炉心設計 評価手法の開発,日立評論,67,11,899~904(昭60-11)
- 2) 鴨志田,外:ATR実証炉用Gd添加燃料のドライアウト 特性試験によるCHF相関式の検証,1992年(第30回)日本

原子力学会春の年会要旨集,K6

3) 西村,外:BWR高燃焼度炉心燃料の開発と適用,日立評 論,**72**,10,1011~1018(平2-10)

